

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0601

李妹洋, 李龙沁, 郝广, 等. 长芒苋入侵对弃耕地土壤种子库群落特征的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(9): 1188-1195.

LI Mei-yang, LI Long-qin, HAO Guang, et al. Effects of *Amaranthus palmeri* on Soil Seed Bank Community Characteristics in Abandoned Cultivated Land [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(9): 1188-1195.

## 长芒苋入侵对弃耕地土壤种子库群落特征的影响

李妹洋<sup>1</sup>, 李龙沁<sup>1</sup>, 郝广<sup>1</sup>, 康濒月<sup>1</sup>, 高越<sup>1</sup>, 李洪远<sup>1,2①</sup> (1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 为阐明外来入侵植物长芒苋(*Amaranthus palmeri*)对土壤种子库群落特征的影响,选取长芒苋不同入侵压力下的弃耕地土壤种子库为研究对象,通过野外调查和萌发试验,揭示弃耕地土壤种子库群落对长芒苋入侵的响应,旨在为入侵植物的科学防控提供依据。结果表明:(1)土壤种子库共计出现30种植物,隶属于17科30属,以一年生草本为主。与轻度入侵区组相比,重度入侵区组土壤种子库物种多样性指数和种子密度都显著降低;土壤种子库物种多样性指数对土层深度的响应不明显,且入侵压力与土层深度之间无交互作用。(2)土壤种子库NMDS排序及PERMANOVA分析结果进一步表明,轻度入侵区组与重度入侵区组群落结构差异显著;重度入侵区组长芒苋已在该地建立长久性土壤种子库,影响本地生态系统的稳定性。(3)种间相关分析结果表明,轻度入侵压力和重度入侵压力均会对大豆(*Glycine max*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)3种植物产生负面效应。

**关键词:** 入侵植物; 长芒苋; 土壤种子库; 入侵压力; 物种多样性

**中图分类号:** X176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)09-1188-08

**Effects of *Amaranthus palmeri* on Soil Seed Bank Community Characteristics in Abandoned Cultivated Land.** LI Mei-yang<sup>1</sup>, LI Long-qin<sup>1</sup>, HAO Guang<sup>1</sup>, KANG Bin-yue<sup>1</sup>, GAO Yue<sup>1</sup>, LI Hong-yuan<sup>1,2①</sup> (1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Cross-media Combined Pollution Control Technology, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** To explore the effects of the alien invasive plant *Amaranthus palmeri* on the characteristics of soil seed bank community, this study selected abandoned soil seed bank under different invasion pressures of *Amaranthus palmeri* as the research subject, and revealed the response of abandoned soil seed bank community to *Amaranthus palmeri* invasion through field investigation and germination experiment, so as to provide the basis for the scientific control of invasive plants. The results show that: (1) A total of 30 species of plants belonging to 17 families and 30 genera, mainly annual herbs, were found in the soil seed bank. The species diversity index and seed density of soil seed bank were significantly lower in the area being severely invaded than in the area being lightly invaded. The species diversity index of the soil seed bank had no obvious response to soil depth, and the invasion pressure has no interaction with soil depth. (2) The analyses of soil seed banks by using the non-metric multidimensional scaling (NMDS) further show that there were significant differences in community structure between the two groups under different invasion pressures. (3) The invasion at moderate and high degrees both exerted negative effects on soybean (*Glycine max*), *Setaria viridis* and *Suaeda glauca*.

**Key words:** invasive plant; *Amaranthus palmeri*; soil seed bank; invasive pressure; species diversity

生物入侵是一个全球性的环境问题,对自然生态系统和农业生态系统有着深远的影响<sup>[1]</sup>。在国际贸易快速发展、各国交流逐渐增加的背景下,生物入侵逐渐成为物种多样性降低的主要因素之一<sup>[2]</sup>。中国是世界上受外来入侵物种危害最严重的国家之一<sup>[3]</sup>,作为生物多样性大国,外来物种很容易在我国多种类型的生态系统中长期定殖<sup>[4]</sup>,对我国生态安全、生物安全和粮食安全构成重大威

胁<sup>[5]</sup>。截至2020年8月,生态环境部发布的公报显示,中国已出现660多个外来入侵物种。

土壤种子库(soil seed bank)是植物生命周期中极为重要的环节,承担着地面植被更新的重要使

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 天津市重大科技专项与工程(18ZXSZSF00200)

① 通信作者 E-mail: eialee@nankai.edu.cn

命,同时也是植物入侵的重要方式和渠道<sup>[6]</sup>。多数研究表明,外来物种入侵会显著影响土壤种子库群落的多样性和丰度<sup>[7]</sup>。土壤种子库作为一种重要的种子资源,代表了一个可以发芽和建立植物群落的物种库,它通过种子萌发和生长参与地上植被的自然更新<sup>[8]</sup>,在生物多样性保护和植被恢复方面具有重要的生态价值,所以了解土壤种子库特征对于评估植被恢复潜力和演替轨迹具有重要意义<sup>[9]</sup>。国内外已有部分研究涉及入侵植物对土壤种子库的影响,如紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)<sup>[10]</sup>、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)<sup>[11-12]</sup>和黄顶菊(*Flaveria bidentis*)<sup>[13]</sup>等。研究<sup>[1]</sup>表明,空心莲子草的入侵降低了土壤种子库中需要光照的物种和陆生物种的幼苗密度,最终影响空心莲子草群落的自然种子恢复潜力。有关入侵植物对土壤种子库影响的研究大多表明入侵植物对土壤种子库物种组成、多样性指数产生影响,进而影响地上群落稳定性及种间关系。这些研究结果为入侵植物管理和土著植被恢复提供了新的启示。

长芒苋(*Amaranthus palmeri*)作为入侵植物之一,已于2016年被纳入第4批外来入侵物种名单。长芒苋原产于美国西部至墨西哥北部<sup>[14]</sup>,是20世纪80年代中期传入我国的一种苋科苋属植物<sup>[15]</sup>。该植物主要生长于田园、郊野等地,入侵性和繁殖性极强<sup>[16]</sup>,可使入侵地农作物大量减产,相比于同期一年生种子植物,长芒苋出苗率极高,其在适当的光照和水分条件下就可以快速萌发。目前,已在华北、华南和华中区域发现该物种的自然分布种群。国内外针对长芒苋入侵机制的研究较少,且研究的关注点主要涉及其生理生态<sup>[17]</sup>及危害和防治<sup>[18]</sup>等,特别是在长芒苋除草剂的研制方面<sup>[19-20]</sup>,也有研究涉及除草剂对土壤种子库的抑制作用<sup>[21-22]</sup>。但针对长芒苋入侵机制等关键科学问题的研究鲜有报道,更未出现从土壤种子库角度进行的相关研究,关于入侵植物长芒苋对土壤种子库群落特征的影响研究仍鲜见。因此,探究长芒苋对入侵地土壤种子库组成与群落结构的影响,有助于进一步揭示长芒苋入侵机制,为苋属入侵植物的科学防控提供依据。

笔者研究以入侵植物长芒苋为对象,选取天津市武清区一块长芒苋自然入侵弃耕地为调查采样地,通过分析入侵地土壤种子库群落的物种组成、多样性指数、种子密度和种间联结性等,试图阐明在长芒苋不同入侵压力 and 不同土层深度条件下土壤种子库物种组成及密度变化特点,以及其对土壤

种子库物种多样性及种间联结性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

调查采样地位于天津市武清区广贤路东侧,地理位置为39°20′50.97″ N,117°4′13.32″ E。该区地处华北冲积平原下段,海拔最高为13 m,最低为2.8 m。该区属温带半湿润大陆性季风气候区,年均气温为11.6℃,年降水量为606 mm。土壤类型以潮土为主,土层深厚,土质较黏。土壤pH偏弱碱性,土壤 $w$ (全氮)为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤 $w$ (全磷)为 $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。经过前期考察,长芒苋入侵前样地区域为栽培作物大豆弃耕地,各样地相邻较近,且近6年来未开展过任何防除措施,确保无人和地理因素干扰。代表性植物有苣荬菜(*Sonchus wightianus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、地肤(*Kochia scoparia*)和藜(*Chenopodium album*)等常见乡土植物。

### 1.2 样品采集

采样地长约400 m,宽约60 m,面积约为2.4万 $\text{m}^2$ 。2021年3月初进行土壤种子库采样工作,采样时间选择在种子萌发前,在表土采集区域依据长芒苋不同入侵压力分别设置试验区组,根据长芒苋盖度差异将试验区组划分为轻度入侵压力区组(<30%)和重度入侵压力区组(>80%),每个区组分为2个样地。每个样地选取6个1 m×1 m代表性样方,每个样方按五点取样法用取土环刀采集0~5、>5~10和>10~15 cm 3个土层深度样品,将不同土层深度样品分别放入塑料自封袋内带回实验室进行萌发试验。

### 1.3 萌发试验

采用温室萌发法,于土壤取样后开始。首先,剔除土壤中杂物(砂石与植物残体如根、茎、叶等),将过滤后的土壤样品均匀平铺在育苗平盘(53.5 cm×28.5 cm×5 cm)内,保证温度、光照和水分等条件的一致性,定期浇水使土壤保持湿润。温度保持在25~30℃,光照为自然光,每2 d浇1次水并及时观察种子萌发情况,待幼苗长出鉴定后,记录并移除。定期人为翻动土壤,整个萌发试验开展到连续3周内没有新的幼苗出现即结束,整个萌发试验周期为70 d。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2016对数据进行初步处理,采用SPSS Statistics 26对数据进行统计分析,采用R 4.1.2的“ggplot2”软件包制图。采用广义线性模型

分析入侵压力和土层深度及其交互作用对土壤种子库的影响。利用非度量多维尺度分析(NMDS)和PERMANOVA分析,比较不同区组土壤种子库群落结构的时空变异性。土壤种子库物种多样性特征采用Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Simpson生态优势度指数和Margalef丰富度指数表征;采用Spearman秩相关系数分析不同入侵压力下土壤种子库物种间相关性。相关公式为

Shannon-Wiener多样性指数( $H$ ):

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

Pielou均匀度指数( $J$ ):

$$J = H / \ln S \quad (2)$$

Simpson优势度指数( $D$ ):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

Margalef丰富度指数( $d$ ):

$$d = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

Spearman秩相关系数( $r$ ):

$$r_{ik} = 1 - \frac{6 \times \sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_{kj})^2}{n^3 - n} \quad (5)$$

式(1)~(5)中, $S$ 为土壤种子库中物种总数; $N$ 为土壤种子库中物种总个体数; $P_i$ 为物种*i*个体数占种子库物种总个体数的重要值; $n$ 为样方数; $x_{ij}$ 和 $x_{kj}$ 为物种*i*与*k*在样方*j*中的秩。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同入侵压力和土层深度条件下土壤种子库组成与密度

共调查两个入侵压力区组,每个区组2个样地,共4个样地。所有区组土壤种子库共统计到30种植物,隶属于17科30属(表1)。

根据广义线性模型检验结果,土壤种子库密度在轻度入侵区组和重度入侵区组之间差异显著。轻度入侵区组土壤种子库有21种,隶属于10科;禾本科植物幼苗最多,共2285株,占幼苗总个体数的33.61%,其中,最多的为狗尾草(*Setaria viridis*)和马唐(*Digitaria sanguinalis*)。苋科植物幼苗占该区幼苗总数的15.78%,幼苗组成全部为长芒苋。重度入侵区组土壤种子库有25种,隶属于14科;苋科植物幼苗最多,共3359株,占幼苗总个体数的87.27%,其中,幼苗组成全部为长芒苋。

根据植物生活型划分,所有区组共有一、二年生草本植物21种,多年生草本植物10种。轻度入

侵区组土壤种子库种子数量占有入侵地种子库总量的63.85%,其中,一、二年生草本植物14种,多年生草本植物7种,两者种子数量分别占该区总种子数量的77.15%和22.85%;重度入侵区组土壤种子库种子数量占有入侵地种子库总量的36.15%,其中,一、二年生草本植物17种,多年生草本植物8种,两者种子数量分别占该区总种子数量的99%和1%,一年生草本植物长芒苋种子数量占该区总种子数量的86.92%。总体来看,轻度入侵区组土壤种子库种子数量比重度入侵区组多,两种入侵压力下植被类型均以一年生草本植物为主。

表1 所有样地土壤种子库密度及物种组成

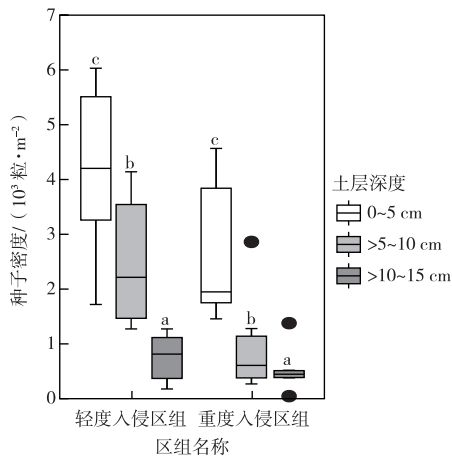
Table 1 Soil seed bank density and species composition in all plots

科名	物种	土壤种子库密度/(粒·m <sup>-2</sup> )	
		轻度入侵区组	重度入侵区组
苋科	长芒苋	390.94 ± 168.66	1223.87 ± 279.12
藜科	碱蓬	319.92 ± 114.66	3.67 ± 3.65
豆科	草木犀	510.84 ± 145.97	0.39 ± 0.37
菊科	刺儿菜	1.11 ± 0.79	1.11 ± 1.20
藜科	藜	275.06 ± 90.08	54.30 ± 20.41
藜科	地肤	14.95 ± 5.40	84.14 ± 42.28
禾本科	狗尾草	636.56 ± 167.69	2.16 ± 1.19
禾本科	马唐	124.22 ± 33.43	2.88 ± 1.77
禾本科	早熟禾	71.75 ± 22.91	0.39 ± 0.37
大麻科	雀草	4.39 ± 1.68	4.39 ± 2.43
豆科	大豆	32.79 ± 7.84	0
菊科	苜蓿菜	45.90 ± 8.85	1.11 ± 0.79
旋花科	打碗花	4.00 ± 2.95	1.84 ± 1.48
菊科	小蓬草	36.46 ± 12.26	4.00 ± 2.86
菊科	山莴苣	0.72 ± 0.73	0.39 ± 0.37
茄科	曼陀罗	0	1.11 ± 0.59
旋花科	牵牛	0	2.56 ± 1.27
锦葵科	苘麻	0.72 ± 0.73	0
紫草科	斑种草	0	0.72 ± 0.50
马齿苋科	马齿苋	2.89 ± 2.07	0
石竹科	繁缕	0	1.11 ± 0.59
菊科	中华苦苣菜	0.39 ± 0.37	1.44 ± 1.13
菊科	假还阳参	0	3.28 ± 1.78
十字花科	芥	0	0.39 ± 0.37
大戟科	续随子	0	3.67 ± 3.65
禾本科	虻子草	0	1.11 ± 0.79
菊科	泥胡菜	0.39 ± 0.37	0.39 ± 0.37
酢浆草科	酢浆草	0	2.16 ± 1.06
菊科	碱菀	0.39 ± 0.37	0
蓼科	西伯利亚蓼	2.56 ± 1.77	0

数据以平均值±标准差表示。

广义线性模型表明,不同入侵压力下土壤种子库密度存在显著差异(图1),轻度入侵区组土壤种子库密度显著大于重度入侵区组( $P < 0.01$ ),而长芒苋种子密度则表现为轻度入侵区组显著小于重度

入侵区组 ( $P < 0.01$ ), 不同土层深度间土壤种子库中有活力的种子数量整体差异显著 ( $P < 0.01$ ), 入侵压力与土层深度之间无交互作用 ( $P > 0.05$ ), 所有入侵压力下土壤种子库中有活力的种子主要分布在上层 (0~5 cm)。



就同一入侵区组而言, 柱子上方英文小写字母不同表示不同土层深度间种子密度差异显著 ( $P < 0.05$ )。箱式图上下端线表示样本最大值和最小值, 箱框线表示数据波动程度, 箱内线表示中位数, 箱外黑点表示样本离群值。

图1 不同入侵压力和土层深度下土壤种子库密度分析  
Fig. 1 Analysis of soil seed bank density under different invasion pressures and soil depths

### 2.2 不同入侵压力和土层深度对土壤种子库物种多样性的影响

利用 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数对土壤种子库群落多样性进行分析。由表 2 可

知, 所有样地土壤种子库物种多样性指数和丰富度指数均表现为轻度入侵区组 > 重度入侵区组, 在入侵压力下所有指数均表现为区组内无差异 ( $P > 0.05$ ), 区组间差异显著 ( $P < 0.01$ )。整体来看, 该地土壤种子库物种较为丰富。

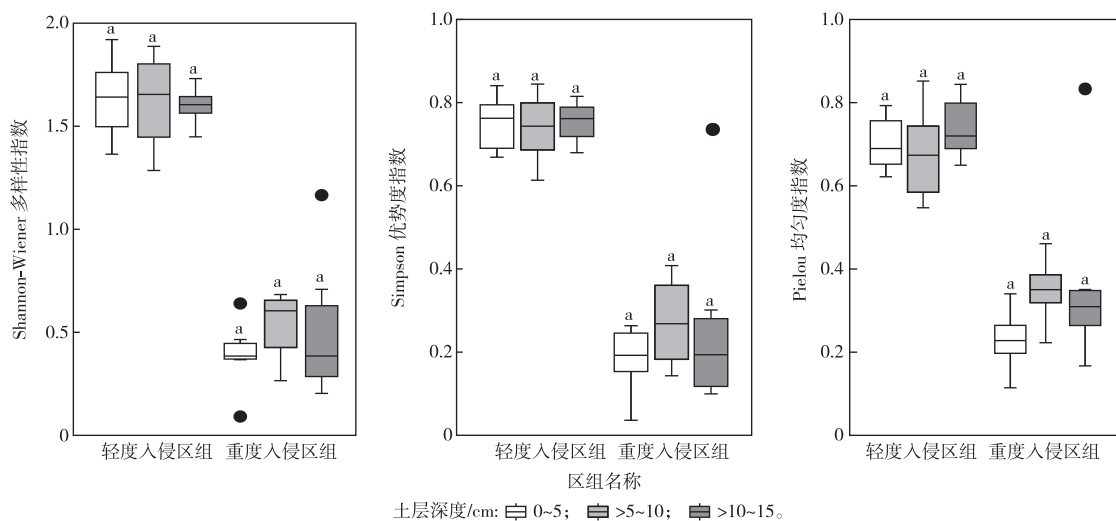
表2 不同入侵压力下土壤种子库物种多样性、丰富度和均匀度指数

Table 2 Species diversity, richness and evenness index of soil seed banks under different invasive pressures

区组	样地	Margalef 丰富度指数	Simpson 优势度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数
轻度入侵	1	1.747 8	0.753 7	1.707 7	0.731 4
	2	1.479 5	0.698 2	1.496 5	0.685 5
重度入侵	3	1.097 0	0.253 6	0.546 6	0.327 0
	4	0.908 7	0.215 3	0.401 1	0.326 1

采用广义线性模型分析入侵压力和土层深度对土壤种子库物种多样性、丰富度和均匀度指数等因变量的影响。广义线性模型结果显示入侵压力与土层深度之间无显著交互作用, 表明不同土层深度土壤种子库持久性受入侵压力的影响不大。

图 2 显示, 重度入侵压力区组土壤种子库 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于轻度入侵压力区组 ( $P < 0.05$ ), 其中, 在不同土层深度间各区组土壤种子库物种多样性指数无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 且土层深度与入侵压力之间无显著交互作用。各区组各土层土壤种子库 Simpson 优势度指数变化规律与 Shannon-Wiener 多样性指数变化一致。



就同一幅图中同一入侵区组而言, 柱子上方英文小写字母不同表示不同土层深度间某指标差异显著 ( $P < 0.05$ )。箱式图上下端线表示样本最大值和最小值, 箱框线表示数据波动程度, 箱内线表示中位数, 箱外黑点表示样本离群值。

图2 入侵压力和土层深度对土壤种子库物种多样性指数和均匀度指数的影响  
Fig. 2 Effects of invasion pressure and soil depth on species diversity index and evenness index of soil seed bank

与轻度入侵区组相比,重度入侵区组 Pielou 均匀度指数显著降低( $P < 0.05$ ,图 2)。不同土层深度间无显著差异( $P > 0.05$ ),土层深度与入侵压力之间无显著交互作用。

### 2.3 长芒苋入侵对土壤种子库物种间联结性的影响

#### 2.3.1 不同入侵压力下土壤种子库群落结构的 NMDS 及 PERMANOVA 分析

基于 Bray-Curtis 相似性系数对不同入侵压力下土壤种子库数据进行非度量多维尺度分析(NMDS),结果(图 3)表明,轻度入侵区组与重度入侵区组重叠部分较少。Stress 为 0.114 8 < 0.2,说明该分析结果具有一定的解释意义,该图形能准确地反映数据的真实分布。采用 PERMANOVA 分析对不同入侵压力下土壤种子库群落差异是否显著进行量化,PERMANOVA 检验结果为  $P = 0.001$ ,表明不同入侵压力下土壤种子库群落结构差异显著,物种组成和分布相似性低,说明长芒苋入侵对土壤种子库群落结构影响较大。

#### 2.3.2 不同入侵压力下土壤种子库物种间相关分析

对所有区组土壤种子库中种子密度占优势( $\geq 90\%$ )的物种进行 Spearman 秩相关分析,得到相关系数半矩阵(表 3~5)。

由表 3~4 可知,所有区组没有与长芒苋呈显著负相关的种对,轻度入侵区组负相关种对数占总种对数的 33.0%,正相关种对数远大于负相关种对

数,与长芒苋相关的种对中呈不显著负相关的植物有碱蓬(*Suaeda glauca*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、葎草(*Humulus scandens*)、大豆(*Glycine max*)和打碗花(*Calystegia hederacea*)。与轻度入侵区组相比,重度入侵区组中负相关种对数占比更高,占总种对数的 39.74%,其中,大豆未在重度入侵区出现,与长芒苋相关的种对中呈不显著负相关的植物有碱蓬、狗尾草和早熟禾(*Poa annua*)。整体来看,轻度入侵区组土壤种子库群落抵抗力和稳定性更高。

当将研究区整体作为分析对象时,由表 5 可知,共有 3 个呈显著和极显著负相关的种对,这 3 个种对都与长芒苋有关,其中,与长芒苋呈显著负相关的植物为碱蓬,呈极显著负相关的植物有狗尾草和大豆,进一步说明长芒苋入侵对本地农作物大豆、碱蓬及狗尾草有明显的排斥作用。

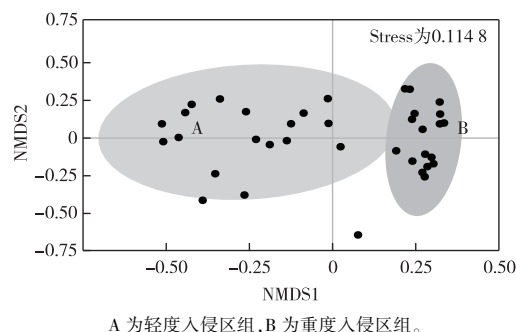


图 3 不同入侵压力下土壤种子库 NMDS 排序结果  
Fig. 3 NMDS sequencing results of soil seed banks under different invasion pressures

表 3 轻度入侵区组土壤种子库物种相关系数半矩阵

Table 3 Semi-matrix of species correlation coefficients of soil seed banks in mildly invasive areas

1	1													
2	-	2												
3	★	-	3											
4	+	+	+	4										
5	★	+	★	+	5									
6	+	+	+	+	+	6								
7	-	★	+	+	+	+	7							
8	+	★	+	+	+	+	★	8						
9	+	+	+	+	+	▲	+	+	9					
10	-	-	-	-	-	-	+	+	-	10				
11	-	★	-	-	-	+	▲	▲	+	+	11			
12	+	+	+	+	▲	-	+	▲	+	+	-	12		
13	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	13	
14	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	14

1—长芒苋 (*Amaranthus palmeri*); 2—碱蓬 (*Suaeda glauca*); 3—草木犀 (*Melilotus officinalis*); 4—刺儿菜 (*Cirsium arvense*); 5—藜 (*Chenopodium album*); 6—地肤 (*Kochia scoparia*); 7—狗尾草 (*Setaria viridis*); 8—马唐 (*Digitaria sanguinalis*); 9—早熟禾 (*Poa annua*); 10—葎草 (*Humulus scandens*); 11—大豆 (*Glycine max*); 12—苣荬菜 (*Sonchus wightianus*); 13—打碗花 (*Calystegia hederacea*); 14—小蓬草 (*Erigeron canadensis*)。正相关: ★表示极显著; ▲表示显著; +表示不显著。负相关: ☆表示极显著; △表示显著; -表示不显著。

表4 重度入侵区组土壤种子库物种相关系数半矩阵

Table 4 Semi-matrix of species correlation coefficient of soil seed bank in severely invasive areas

1	1													
2	-	2												
3	+	★	3											
4	+	★	★	4										
5	★	+	+	+	5									
6	▲	+	+	+	+	6								
7	-	-	-	-	+	+	7							
8	+	-	-	-	-	+	+	8						
9	-	-	-	-	-	-	+	-	9					
10	+	-	-	-	+	+	+	+	-	10				
11											11			
12	+	★	★	★	+	+	-	-	-	-		12		
13	+	★	★	★	+	+	-	-	-	+		▲	13	
14	+	★	★	★	+	+	-	-	-	-		▲	▲	14

数字与符号含义见表3。

表5 所有区组土壤种子库物种相关系数半矩阵

Table 5 Semi-matrix of species correlation coefficients of soil seed banks in all regional groups

1	1													
2	△	2												
3	-	★	3											
4	+	+	+	4										
5	+	★	★	▲	5									
6	▲	+	-	+	-	6								
7	☆	★	★	+	★	-	7							
8	-	★	★	-	★	+	★	8						
9	-	★	★	+	▲	+	★	★	9					
10	-	+	+	-	+	+	+	+	-	10				
11	☆	★	★	-	▲	-	★	★	★	+	11			
12	-	★	★	+	★	-	★	★	★	+	★	12		
13	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+	13	
14	-	★	★	+	★	-	★	★	+	+	★	★	+	14

数字与符号含义见表3。

### 3 讨论

#### 3.1 长芒苋入侵对土壤种子库组成与密度的影响

研究区属于城郊区,轻度入侵区组与重度入侵区组土壤种子库种子密度分别高达 2 477 和 1 402 粒·m<sup>-2</sup>,与天津城郊样地土壤种子库研究规模<sup>[24]</sup>类似,其中,重度入侵区组长芒苋密度是轻度入侵区组的 3 倍。外来物种对生态系统的入侵是对群落结构的最大威胁之一<sup>[9]</sup>,研究入侵种是否对群落变化产生影响,一般从群落组成及结构入手进行分析。笔者研究与张敏等<sup>[25]</sup>研究方法一致,基于 Bray-Curtis 距离对两个区组土壤种子库群落数据进行 NMDS 和 PERMANOVA 分析,发现长芒苋入侵显著干扰土壤种子库群落结构及物种组成,入侵压力的不同导致土壤种子库的差异性。

近地表取样的土壤种子库往往更加多样化和

丰富<sup>[26]</sup>,笔者研究中随着土层深度的增加,长芒苋种子密度显著降低且主要分布在上层(0~5 cm),轻度入侵区组土壤种子库密度为重度入侵区组的 2 倍,轻度入侵区组不同土层深度物种组成差异显著且上层物种主要为长芒苋,而重度入侵区组中层(>5~10 cm)与下层(>10~15 cm)深度之间物种组成无显著差异,认为此与长芒苋的入侵年限有关;另外,对于一些具有休眠特性的物种而言,采用诱萌法可能会带来一些实验误差。这也与长芒苋首先在上层土壤种子库中聚集,进而入侵整个土壤种子库群落有关。相比于其他物种,长芒苋出苗期早、结种量大且适生性强,种子很容易通过水进行远距离漂浮传播,在黏质土中易停留在土壤表面从而更易聚集于种子库。该植物具有较高的光合速率,可能存在较强的表型可塑性,因此,在无人干扰的弃耕地土壤种子库中更易成功定殖并快速扩

张,因此需要在土壤种子库萌芽初期、长芒苋可能出现爆发性生长的时候采取一定的防控措施。

### 3.2 长芒苋入侵对土壤种子库物种多样性及种间关系的影响

笔者研究中取样地为长芒苋入侵的大豆弃耕地,但近几年来该弃耕地无人干扰,是在自然演替过程中形成的土壤种子库。这也可能是土壤种子库中除入侵植物长芒苋外杂草占比较高而大豆占比较低的原因,DALTON 等<sup>[27]</sup>研究认为土壤种子库的多样性及丰富度高表明其对植物入侵具有一定的抵御能力<sup>[28]</sup>。

笔者研究中所有区组土壤种子库中 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均表现为重度入侵区组小于轻度入侵区组,但 Margalef 丰富度却表现为重度入侵区组大于轻度入侵区组。考虑到重度入侵区组在统计个别物种时将其计入物种数量,但未将不同区组密度大小等本底值计入其中,个别杂草相对于整个区组而言,个体数量微乎其微,可忽略不计,且周边林下杂草有向样地扩散的趋势,这也可能是重度入侵区组物种丰富度大于轻度入侵区组的原因。

相较于轻度入侵区组,重度入侵区组土壤种子库物种多样性指数明显降低,这与王瑞丽等<sup>[29]</sup>研究结果类似,即长芒苋与其他大部分入侵植物一样,对土壤种子库物种多样性产生负面影响,表明长芒苋通过降低土壤种子库物种多样性、干扰其群落物种组成,从而快速入侵当地生态系统。RODRIGUEZ<sup>[30]</sup>研究认为,将入侵物种与本土植物的种间作用纳入未来的生态学研究,对于明确生态系统过程和生物多样性变化至关重要。笔者研究对土壤种子库相关物种进行 Spearman 秩相关分析,结果表明大豆、碱蓬和狗尾草是受长芒苋负面影响较大的物种,考虑到长芒苋易出现在沿农田边缘的生境内且在生长后期株高能达到 2 m 及以上,所以易入侵晚播作物如大豆和玉米等,BRUNDU 等<sup>[14]</sup>与章茂林等<sup>[15]</sup>的研究中也提到了长芒苋的入侵易使大豆等粮食作物减产;在花果期长芒苋植株高大、枝叶茂盛,会影响狗尾草和碱蓬等矮小植株的光合作用。

长芒苋与大豆、碱蓬和狗尾草在重度入侵区组与轻度入侵区组半矩阵系数表中呈现不显著负相关,当将两个区组作为整体分析时,则呈显著负相关。重度入侵区组没有大豆出现,这是因为该地弃耕以及长芒苋入侵年限较长,致使大豆种子库逐渐消亡。土壤种子库持久性与种子大小有关<sup>[31]</sup>,长芒苋种子小、易夹带传播,再加上大豆弃耕地无人

干扰,认为这是其在短短几年内快速入侵土壤种子库及当地生态系统的原因。探究长芒苋入侵农田是否有利于当地生物多样性的稳定与发展以及通过何种方式作用于本土植物对于进一步防控长芒苋十分必要<sup>[32]</sup>,同时今后也要加强长芒苋在进口粮谷和粮食产区内的监测预警和防范管控。

#### 参考文献:

- [1] LIU Z N, GE X L, FU Z Y, et al. *Alternanthera philoxeroides* Invasion Affects the Soil Seed Bank of Reed Community[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 180: 104-196.
- [2] 杨健. 我国外来生物入侵的现状及管理对策研究[D]. 荆州: 长江大学, 2013. [YANG Jian. The Status and Management Countermeasures of Alien Biological Invasion in China[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2013.]
- [3] 丁晖, 马方舟, 吴军, 等. 关于构建我国外来入侵物种环境危害防控监督管理体系的思考[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(5): 652-657. [DING Hui, MA Fang-zhou, WU Jun, et al. Considerations of Building up a Supervision and Management System for Prevention and Control of Invasive Alien Species Posing Environmental Hazards in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5): 652-657.]
- [4] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展[J]. *生物多样性*, 2012, 20(5): 581-611. [JU Rui-ting, LI Hui, SHI Zheng-ren. Progress of Biological Invasions Research in China over the Last Decade [J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(5): 581-611.]
- [5] 胡亚萍, 周旭, 舒秋香, 等. 从加强生态环境保护角度探析我国外来入侵物种防控策略[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 273-278. [HU Ya-ping, ZHOU Xu, SHU Qiu-xiang, et al. Analysis of Prevention and Control Strategies for Invasive Alien Species in China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 273-278.]
- [6] HOLMES P M, COWLING R M. Diversity, Composition and Guild Structure Relationships between Soil-stored Seed Banks and Mature Vegetation in Alien Plant-invaded South African Fynbos Shrublands[J]. *Plant Ecology*, 1997, 133(1): 107-122.
- [7] 李洪远, 莫训强, 郝翠. 近 30 年来土壤种子库研究的回顾与展望[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 731-737. [LI Hong-yuan, MO Xun-qiang, HAO Cui. A Review of Study on Soil Seed Bank in the Past Thirty Years [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 731-737.]
- [8] HU Z H, YANG Y, LENG P S, et al. Characteristics of Soil Seed Bank in Plantation Forest in the Rocky Mountain Region of Beijing, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(1): 91-97.
- [9] WANG N, HE X Y, ZHAO F W, et al. Soil Seed Bank in Different Vegetation Types in the Loess Plateau Region and Its Role in Vegetation Restoration [J]. *Restoration Ecology*, 2020, 28(Suppl. 1): A5-A12.
- [10] 王有兵, 严毅, 王亚婷, 等. 紫茎泽兰入侵对林分土壤可萌发种子库特征及生物多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2015,

- 43(2):42-46.[WANG You-bing, YAN Yi, WANG Ya-ting, et al. Germinable Soil Seed Bank Traits and Species Diversity of the Forest Invaded by *Eupatorium adenophorum* (Spreng.) [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2):42-46.]
- [11] 曹亚蒙. 加拿大一枝黄花对入侵地植物群落影响及其生境因子分析[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018. [CAO Ya-meng. Study on the Community and Habitat Factors Analysis of the Invaded Land by *Solidago canadensis* L [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.]
- [12] KUNDEL D, VAN KLEUNEN M, DAWSON W. Invasion by *Solidago* Species Has Limited Impacts on Soil Seed Bank Communities [J]. Basic and Applied Ecology, 2014, 15(7):573-580.
- [13] 张思宇, 田佳源, 祁小旭, 等. 外来入侵植物黄顶菊生长及生理生态特性对镉胁迫的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3):445-452. [ZHANG Si-yu, TIAN Jia-yuan, QI Xiao-xu, et al. Growth, Physiological and Ecological Responses of Invasive Plant *Flaveria bidentis* to Cd Stress [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(3):445-452.]
- [14] BRUNDU G, CHAPMAN D, FERRELL J, et al. *Amaranthus palmeri* S. Watson [J]. EPPO Bulletin, 2020, 50(3):535-542.
- [15] 章茂林, 左静, 肖湘黔. 长芒苋入侵长沙地区风险防控研究[J]. 现代农业科技, 2019(5):193, 195. [ZHANG Mao-lin, ZUO Jing, XIAO Xiang-qian. Study on Risk Prevention and Control of *Amaranthus longissima* Invasion in Changsha Area [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(5):193, 195.]
- [16] 车晋滇. 外来入侵杂草长芒苋[J]. 杂草科学, 2008, 26(1):58-60. [CHE Jin-dian. Invasive Weed *Amaranthus longiflorus* [J]. Weed Science, 2008, 26(1):58-60.]
- [17] MESGARAN M B, MATZRAFI M, OHADI S. Sex Dimorphism in Dioecious *Palmer amaranth* (*Amaranthus palmeri*) in Response to Water Stress [J/OL]. Planta, 2021, 254(17). [2022-06-16]. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03664-7>.
- [18] 李永革, 曹晶晶, 王瑞, 等. 基于层次分析法的外来杂草长芒苋入侵河南省北部的风险评估[J]. 植物检疫, 2021, 35(5):60-65. [LI Yong-ge, CAO Jing-jing, WANG Rui, et al. Risk Assessment Based on Analytic Hierarchy Process of an Invasive Alien Weed, *Amaranthus palmeri*, in Northern Henan Province [J]. Plant Quarantine, 2021, 35(5):60-65.]
- [19] VILA-AIUB M M, GOH S S, GAINES T A, et al. No Fitness Cost of Glyphosate Resistance Endowed by Massive *EPSPS* Gene Amplification in *Amaranthus palmeri* [J]. Planta, 2014, 239(4):793-801.
- [20] 伏建国, 李井干, 吴晶, 等. 利用双重数字 PCR 检测进口美国大豆中长芒苋的 *EPSPS* 基因拷贝数[J]. 植物检疫, 2022, 36(2):29-33. [FU Jian-guo, LI Jing-gan, WU Jing, et al. Detection of *EPSPS* Gene Copy Number of *Amaranthus palmeri* in Imported US Soybean by Duplex Digital PCR [J]. Plant Quarantine, 2022, 36(2):29-33.]
- [21] SOSNOSKIE L M, CULPEPPER A S. Glyphosate-resistant *Palmer amaranth* (*Amaranthus palmeri*) Increases Herbicide Use, Tillage, and Hand-weeding in Georgia Cotton [J]. Weed Science, 2014, 62(2):393-402.
- [22] TEASTER N D, HOAGLAND R E. Characterization of Glyphosate Resistance in Cloned *Amaranthus palmeri* Plants [J]. Weed Biology and Management, 2014, 14(1):1-10.
- [23] 张梅, 马可心, 唐丽丽, 等. 外来入侵植物反枝苋对本地植物功能性状的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10):2925-2933. [ZHANG Mei, MA Ke-xin, TANG Li-li, et al. The Effects of Invasive Species *Amaranthus retroflexus* on Functional Traits of Native Plant Species [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(10):2925-2933.]
- [24] 贺梦璇, 莫训强, 李洪远. 天津地区土壤种子库特征及植被恢复潜力研究[J]. 农业科技与信息(现代园林), 2013, 10(11):38-44. [HE Meng-xuan, MO Xun-qiang, LI Hong-yuan. The Study on Soil Seed Bank and Its Vegetation Restoration Ability in Tianjin [J]. Modern Landscape Architecture, 2013, 10(11):38-44.]
- [25] 张敏, 宋晓阳. 热带森林群落土壤种子库对海拔梯度的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9):2390-2400. [ZHANG Min, SONG Xiao-yang. Responses of Soil Seed Banks in Tropical Forests to an Elevational Gradient [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(9):2390-2400.]
- [26] 邢旭明, 马晓东, 张元明. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮对土壤种子库多样性与分布特征的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3):612-620. [XING Xu-ming, MA Xiao-dong, ZHANG Yuan-ming. Effects of Biological Soil Crusts on Soil Seed Bank Diversity and Distribution Characteristics in Gurbantunggut Desert [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3):612-620.]
- [27] DALTON R L, CARPENTER D J, BOUTIN C, et al. Factors Affecting Soil Seed Banks of Riparian Communities in an Agricultural Ecosystem: Potential for Conservation of Native Plant Diversity [J]. Applied Vegetation Science, 2017, 20(3):446-458.
- [28] SHIFERAW W, BEKELE T, DEMISSEW S, et al. *Prosopis juliflora* Invasion and Environmental Factors on Density of Soil Seed Bank in Afar Region, Northeast Ethiopia [J]. Journal of Ecology and Environment, 2019, 43(1). DOI:10.1186/s41610-019-0133-4.
- [29] 王瑞丽, 董合干, 刘彤, 等. 入侵恶性杂草豚草和三裂叶豚草土壤种子库特征及其对地上种群的贡献[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(1):72-79. [WANG Rui-li, DONG He-gan, LIU Tong, et al. Characteristics of Soil Seed Banks and Their Contribution to Aboveground Population of Invasive Weeds *Ambrosia artemisiifolia* and *A. trifida* [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2021, 39(1):72-79.]
- [30] RODRIGUEZ L F. Can Invasive Species Facilitate Native Species? Evidence of How, When, and Why These Impacts Occur [J]. Biological Invasions, 2006, 8(4):927-939.
- [31] THOMPSON K, BAKKER J, BEKKER R. Ecological Correlates of Seed Persistence in Soil in the North-west European Flora [J]. Journal of Ecology, 1998, 86:163-169.
- [32] BAKKER J P, POSCHLOD P, STRYKSTRA R J, et al. Seed Banks and Seed Dispersal: Important Topics in Restoration Ecology [J]. Acta Botanica Neerlandica, 1996, 45(4):461-490.

作者简介: 李妹洋(1999—), 女, 河北邢台人, 主要从事植物入侵与土壤种子库方面的研究。E-mail: limeiyangal@163.com

(责任编辑: 李祥敏)